

09/857482

JC18 Rec'd PCT/PTO 01 JUN 2001

Attorney Docket No. 96790.P359
Express Mail No. EL651890639US

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK

In re application of:

Tatsuya Hojo et al.

For: DESIGN DEVICE OF CONTROLLER

REQUEST FOR PRIORITY

Hon. Commissioner of Patents and Trademarks
Washington, D.C. 20231

Dear Sir:

Applicant respectfully requests a convention priority for the
above-captioned application, namely
Japanese Patent Application No. 283978/1999 filed October 5, 1999,
Japanese Patent Application No. 283981/1999 filed October 5, 1999,
PCT Patent Application No. PCT/JP00/06898 filed October 4, 2000.

Respectfully submitted,

BLAKELY, SOKOLOFF, TAYLOR & ZAFMAN

Dated: 6/1/01

By:

Eric S. Hyman Reg. No. 30,139

12400 Wilshire Boulevard
Seventh Floor
Los Angeles, California 90025
(310) 207-3800

JP00/6898

09/857482

PCT/JP00/06898

日本国特許庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

04.10.00

REC'D 28 NOV 2000

W/DO PCT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office.

出願年月日

Date of Application:

1999年10月 5日

EKV

出願番号

Application Number:

平成11年特許願第283978号

出願人

Applicant (s):

株式会社山武

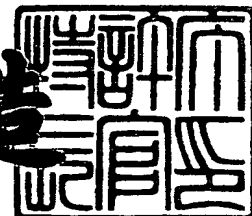
**PRIORITY
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2000年11月10日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2000-3092504

【書類名】 特許願

【整理番号】 19990115

【提出日】 平成11年10月 5日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G05B 13/02

【発明者】

【住所又は居所】 東京都渋谷区渋谷 2 丁目 1 2 番 1 9 号 株式会社 山武
内

【氏名】 北條 達也

【発明者】

【住所又は居所】 東京都渋谷区渋谷 2 丁目 1 2 番 1 9 号 株式会社 山武
内

【氏名】 黒崎 淳

【特許出願人】

【識別番号】 000006666

【氏名又は名称】 株式会社 山武

【代理人】

【識別番号】 100064621

【弁理士】

【氏名又は名称】 山川 政樹

【電話番号】 03-3580-0961

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 006194

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9722147

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 コントローラの設計装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 操作量に対する制御対象モデルと、この制御対象モデルの前段に設けられた、制御対象モデルへの操作量入力を調整するための操作量重み調整手段とを有する一般化プラントを用いて、 H_∞ 制御理論に基づいてコントローラの設計を行う設計装置において、

前記一般化プラントを記憶する記憶手段と、

前記制御対象モデルの周波数応答を算出する周波数応答算出手段と、

前記操作量重み調整手段による操作量の重み付けを決定するスケーリング行列 T を、前記制御対象モデルの周波数応答に基づき前記制御対象モデルの各ゲインが揃うように算出するスケーリング行列算出手段と、

前記記憶手段に記憶された一般化プラントの操作量重み調整手段に前記スケーリング行列 T を適用して、前記コントローラを導出するコントローラ算出手段とを備えることを特徴とするコントローラの設計装置。

【請求項 2】 請求項 1 記載のコントローラの設計装置において、

前記スケーリング行列算出手段は、操作量 u の数を N (N は 1 以上の整数) 種類、制御量 y の数を L (L は 1 以上の整数) 種類、前記制御対象モデルの N 番目の操作量 u_N から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数の H_∞ ノルムを $\| G_{yLuN} \|_\infty$ としたとき、前記スケーリング行列 T を

【数 1】

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T_N \end{bmatrix}$$

$$T_N = \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y1u1}\|_\infty, \|G_{y1u2}\|_\infty, \dots, \|G_{y1uN}\|_\infty)}{\|G_{y1uN}\|_\infty}$$

$$+ \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y2u1}\|_\infty, \|G_{y2u2}\|_\infty, \dots, \|G_{y2uN}\|_\infty)}{\|G_{y2uN}\|_\infty}$$

$$+ \dots + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{yLu1}\|_\infty, \|G_{yLu2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLuN}\|_\infty)}{\|G_{yLuN}\|_\infty}$$

のように算出することを特徴とするコントローラ的设计装置。

【請求項 3】 操作量に対する第 1 の制御対象モデルと、外乱に対する第 2 の制御対象モデルと、前記第 1 の制御対象モデルの前段に設けられた、第 1 の制御対象モデルへの操作量入力を調整するための操作量重み調整手段とを有する一般化プラントを用いて、H インフィニティ (H_∞) 制御理論に基づいてコントローラ的设计を行う设计装置において、

前記一般化プラントを記憶する記憶手段と、

前記第 1 の制御対象モデルと第 2 の制御対象モデルの周波数応答を算出する周波数応答算出手段と、

前記操作量重み調整手段による操作量の重み付けを決定するスケーリング行列 T を、前記第 1、第 2 の制御対象モデルの周波数応答に基づき前記第 2 の制御対象モデルの各ゲイン中の最大値に前記第 1 の制御対象モデルの各ゲインが揃うように算出するスケーリング行列算出手段と、

前記記憶手段に記憶された一般化プラントの操作量重み調整手段に前記スケーリング行列 T を適用して、前記コントローラを導出するコントローラ算出手段とを備えることを特徴とするコントローラ的设计装置。

【請求項 4】 請求項 3 記載のコントローラ的设计装置において、

前記スケーリング行列算出手段は、操作量 u の数を N (N は 1 以上の整数) 種類、外乱 w の数を J (J は 1 以上の整数) 種類、制御量 y の数を L (L は 1 以上の整数) 種類、前記第 1 の制御対象モデルの N 番目の操作量 u_N から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数の H^∞ ノルムを $\|G_{yLuN}\|_\infty$ 、前記第 2 の制御対象モデルの J 番目の外乱 w_J から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数の H^∞ ノルムを $\|G_{yLwJ}\|_\infty$ としたとき、前記スケーリング行列 T を

【数 2】

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T_N \end{bmatrix}$$

$$T_N = \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y1w1}\|_\infty, \|G_{y1w2}\|_\infty, \dots, \|G_{y1wJ}\|_\infty)}{\|G_{y1uN}\|_\infty} + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y2w1}\|_\infty, \|G_{y2w2}\|_\infty, \dots, \|G_{y2wJ}\|_\infty)}{\|G_{y2uN}\|_\infty} + \dots + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{yLw1}\|_\infty, \|G_{yLw2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLwJ}\|_\infty)}{\|G_{yLuN}\|_\infty}$$

のように算出することを特徴とするコントローラ的设计装置。

【請求項 5】 請求項 1 または 3 記載のコントローラ的设计装置において、

前記記憶手段に記憶された一般化プラントは、前記操作量重み調整手段と操作量に対する制御対象モデルとコントローラとからなる閉ループ系の内部に制御量を調整するための制御量重み調整手段を有し、

前記设计装置は、前記制御量重み調整手段による制御量の重み付けを決定する重み行列 S を設定する設定手段を備えることを特徴とするコントローラ的设计装置。

【請求項 6】 請求項 1 または 3 記載のコントローラ的设计装置において、

前記記憶手段に記憶された一般化プラントは、前記操作量重み調整手段と操作量に対する制御対象モデルとコントローラとからなる閉ループ系の設定値追従特性を決定するための周波数感度重み調整手段の前段または後段に、制御量を調整するための制御量重み調整手段を有し、

前記設計装置は、前記制御量重み調整手段による制御量の重み付けを決定する重み行列 S を設定する設定手段を備えることを特徴とするコントローラの設計装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、多変数コントローラの設計を H インフィニティ ($H\infty$) 制御理論に基づいて行う設計装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】

近年、フィードバック制御の分野では、実際の制御対象と制御対象の数値モデルとの誤差を考慮した制御設計を可能にする $H\infty$ 制御理論を利用することが多くなってきている。従来の制御理論では、制御系を設計するとき、伝達関数や状態方程式で表される制御対象のモデルを求め、そのモデルを安定化するように制御系を設計する。このとき、実際の制御対象とモデルとの誤差が十分に小さい場合には、モデルを安定化するように設計されたコントローラが実際の制御対象をも安定化することができる。しかし、何らかの理由でモデルと実際の制御対象との誤差が大きい場合には、コントローラが実際の制御対象を安定化できない場合がある。

【0003】

$H\infty$ 制御理論では、実際の制御対象と設計に用いる数値モデルとの間に誤差があっても、その誤差に関する情報が得られる場合、その誤差を考慮に入れて、実際の制御対象を安定化するコントローラを設計することが可能になる。また、 $H\infty$ 制御理論は、従来の制御理論と比較して、制御系を設計する際に制御仕様が直感的に与えやすいと言われている。例えば、従来の制御理論を用いて制御系を設

計する場合では、その設計仕様は閉ループ系の極であったり、評価関数の重み行列であった。しかし、これらの値の物理的な意味は不明確であり、その設定には多くの試行錯誤が必要であった。

【0004】

これに対して、 H_∞ 制御理論では、制御対象とコントローラとからなる閉ループ系の周波数応答で制御仕様を指定することができる。 H_∞ 制御理論は、このような利点を持っているにもかかわらず、理論的に難解であり、実際の制御系を構築するには相当な知識を必要とすること、プロセス制御など周波数応答で考えにくい対象に対しては制御仕様を与えにくい等の理由であまり実用化されていなかったのが現状である。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】

多変数制御系の設計の際に用いられる制御対象モデルでは、各操作量から制御量に至る誤差成分の大きさがまちまちとなる。このように各操作量に対するモデルの誤差成分がまちまちであるのに対し、 H_∞ 制御理論では、誤差のゲインが大きい成分を基準にコントローラを設計するため、誤差のゲインが小さい成分については応答が非常に保守的、すなわち過剰に安定的なものになりがちである。また、制御量間の干渉を避けるために制御量毎の制御の重みを調整する必要がある場合がある。そこで、制御対象モデルの誤差の大きさを揃え、かつ制御量に対する制御の重み付けを行うために、スケーリング行列 T と呼ばれる操作量重みを導入することが提案されている。しかしながら、従来の設計手法では、スケーリング行列 T を決定する一般的な手法が確立されておらず、スケーリング行列 T を適切に選ぶことが難しいという問題点があった。また、スケーリング行列 T の決定が困難であったため、多変数コントローラの設計に H_∞ 制御理論を利用しにくいという問題点があった。

本発明の目的は、スケーリング行列を容易に決定することができ、 H_∞ 制御理論に基づくコントローラの設計を容易に実現することができる設計装置を提供することである。

【0006】

【課題を解決するための手段】

本発明のコントローラ的设计装置は、操作量に対する制御対象モデル（11）と、この制御対象モデルの前段に設けられた、制御対象モデルへの操作量入力を調整するための操作量重み調整手段（16）とを有する一般化プラントを用いて、 H_∞ 制御理論に基づいて设计を行うものである。この设计装置は、一般化プラントを記憶する記憶手段（3）と、前記制御対象モデルの周波数応答を算出する周波数応答算出手段（4）と、前記操作量重み調整手段による操作量の重み付けを決定するスケーリング行列 T を、前記制御対象モデルの周波数応答に基づき前記制御対象モデルの各ゲインが揃うように算出するスケーリング行列算出手段（5）と、前記記憶手段に記憶された一般化プラントの操作量重み調整手段に前記スケーリング行列 T を適用して、前記コントローラを導出するコントローラ算出手段（6）とを備えている。

また、本発明のコントローラ的设计装置の1構成例として、前記スケーリング行列算出手段は、操作量 u の数を N （ N は 1 以上の整数）種類、制御量 y の数を L （ L は 1 以上の整数）種類、前記制御対象モデルの N 番目の操作量 u_N から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数の H_∞ ノルムを $\|G_{yLuN}\|_\infty$ としたとき、前記スケーリング行列 T を

【数 3】

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T_N \end{bmatrix}$$

$$T_N = \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y1u1}\|_\infty, \|G_{y1u2}\|_\infty, \dots, \|G_{y1uN}\|_\infty)}{\|G_{y1uN}\|_\infty}$$

$$+ \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y2u1}\|_\infty, \|G_{y2u2}\|_\infty, \dots, \|G_{y2uN}\|_\infty)}{\|G_{y2uN}\|_\infty}$$

$$+ \dots + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{yLu1}\|_\infty, \|G_{yLu2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLuN}\|_\infty)}{\|G_{yLuN}\|_\infty}$$

のように算出するものである。

【0 0 0 7】

また、本発明のコントローラ的设计装置は、操作量に対する第1の制御対象モデル(11)と、外乱に対する第2の制御対象モデル(12)と、前記第1の制御対象モデルの前段に設けられた、第1の制御対象モデルへの操作量入力を調整するための操作量重み調整手段(16)とを有する一般化プラントを用いて、Hインフィニティ(H ∞)制御理論に基づいてコントローラ的设计を行うものである。この设计装置は、前記一般化プラントを記憶する記憶手段(3)と、前記第1の制御対象モデルと第2の制御対象モデルの周波数応答を算出する周波数応答算出手段(4)と、前記操作量重み調整手段による操作量の重み付けを決定するスケーリング行列Tを、前記第1、第2の制御対象モデルの周波数応答に基づき前記第2の制御対象モデルの各ゲイン中の最大値に前記第1の制御対象モデルの各ゲインが揃うように算出するスケーリング行列算出手段(5)と、前記記憶手段に記憶された一般化プラントの操作量重み調整手段に前記スケーリング行列Tを適用して、前記コントローラを導出するコントローラ算出手段(6)とを備えている。

また、本発明のコントローラの設計装置の 1 構成例として、前記スケーリング行列算出手段は、操作量 u の数を N (N は 1 以上の整数) 種類、外乱 w の数を J (J は 1 以上の整数) 種類、制御量 y の数を L (L は 1 以上の整数) 種類、前記第 1 の制御対象モデルの N 番目の操作量 u_N から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数の H^∞ ノルムを $\|G_{yLuN}\|_\infty$ 、前記第 2 の制御対象モデルの J 番目の外乱 w_J から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数の H^∞ ノルムを $\|G_{yLwJ}\|_\infty$ としたとき、前記スケーリング行列 T を

【数 4】

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T_N \end{bmatrix}$$

$$T_N = \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y1w1}\|_\infty, \|G_{y1w2}\|_\infty, \dots, \|G_{y1wJ}\|_\infty)}{\|G_{y1uN}\|_\infty} \\ + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y2w1}\|_\infty, \|G_{y2w2}\|_\infty, \dots, \|G_{y2wJ}\|_\infty)}{\|G_{y2uN}\|_\infty} \\ + \dots + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{yLw1}\|_\infty, \|G_{yLw2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLwJ}\|_\infty)}{\|G_{yLuN}\|_\infty}$$

のように算出するものである。

【0008】

また、本発明のコントローラの設計装置の 1 構成例として、記憶手段 (3 a) に記憶された一般化プラントは、前記操作量重み調整手段 (1 6) と操作量に対する制御対象モデル (1 1) とコントローラとからなる閉ループ系の内部に制御量を調整するための制御量重み調整手段 (2 0) を有し、設計装置は、前記制御量重み調整手段による制御量の重み付けを決定する重み行列 S を設定する設定手段 (7 ~ 9) を備えるものである。

また、本発明のコントローラの設計装置の 1 構成例として、記憶手段 (3 a)

に記憶された一般化プラントは、前記操作量重み調整手段（16）と操作量に対する制御対象モデル（11）とコントローラとからなる閉ループ系の設定値追従特性を決定するための周波数感度重み調整手段（13）の前段または後段に、制御量を調整するための制御量重み調整手段（20）を有し、設計装置は、前記制御量重み調整手段による制御量の重み付けを決定する重み行列 S を設定する設定手段（7～9）を備えるものである。

【0009】

【発明の実施の形態】

〔実施の形態の1〕

次に、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。図1は、本発明の第1の実施の形態となるコントローラの設計装置の構成を示すブロック図である。図1の設計装置は、制御対象モデルのパラメータを入力するための制御対象モデル入力部1と、モデルパラメータを後述する記憶部に登録する制御対象モデル登録部2と、一般化プラントの数式とこの一般化プラントの一部である制御対象モデルの数式とを記憶する記憶部3と、制御対象モデルの周波数応答を算出する周波数応答算出部4と、制御対象モデルの誤差の大きさを揃えるためのスケーリング行列 T を、制御対象モデルの各ゲイン中の最大値に前記各ゲインが揃うように算出するスケーリング行列算出部5と、記憶部3に記憶された一般化プラントにスケーリング行列 T を適用して、コントローラのパラメータを導出するコントローラ算出部6とを有している。

【0010】

H^∞ 制御理論に基づくコントローラ設計用アルゴリズムは、制御対象を用いて表現された一般化プラントに基づいて設計される。したがって、最初に一般化プラントについて説明する。

【0011】

図2は実際の制御対象を数式化したモデルの構成を示すブロック図である。図2に示す制御対象の数値モデルは、操作量 u に対する第1の制御対象モデル11と、外乱 w に対する第2の制御対象モデル12とからなる。 P_u はモデル11の伝達関数、 P_w はモデル12の伝達関数である。モデル11、12は、実際の制

御対象に対するステップ応答テストより得られたデータを用いてモデル同定を行った結果得られたものである。制御対象の出力である制御量 y は、モデル 1 1, 1 2 の出力を足し合わせたものとなる。

【 0 0 1 2 】

このような制御対象の数値モデルを含む従来の一般化プラントの構成を図 3 に示す。一般化プラントとは、図 3 に示すように、設定値追従特性を決定するために用いられる感度重み W_s と呼ばれる周波数重みと、ロバスト安定性を決定するために用いられる相補感度重み W_t と呼ばれる周波数重みとを設けて、制御対象の入力（操作量） u 、入力（外乱） w 、出力（制御量） y 以外に設定値 r 、出力 z_1 , z_2 を導入して、設定値追従特性とロバスト安定性の両者を実現するためのものである。

【 0 0 1 3 】

偏差 $e (= y - r)$ は、観測量、すなわちコントローラ（不図示）に対する入力となる。1 3 は感度重み W_s を表すブロック（周波数感度重み調整手段）であり、 z_1 は設定値追従特性の評価を行うための出力である。また、1 4 は相補感度重み W_t を表すブロックであり、 z_2 はロバスト安定性の評価を行うための出力である。

【 0 0 1 4 】

従来は、図 3 に示した一般化プラントにおいて、制御対象の数値モデルを基にモデルの不確かさを見積もって相補感度重み W_t を決め、設定値 r への追従性を考慮して周波数特性を直接指定して感度重み W_s を決めて、 γ イテレーションによりコントローラのパラメータを決定していた。しかしながら、図 3 の一般化プラントを用いると、各操作量のプラント出力に対するゲインの差により、ゲインが大きいものを基準にコントローラを設計することになるため、得られるコントローラは非常に保守的、すなわち過剰に安定的なものになりがちである。

【 0 0 1 5 】

また、設定値追従特性と外乱応答特性は、通常、相反するものであるため、設計時にそれらを同じ重みを持って設計するよりは、目的に応じて重み付けできる方が好ましい。

さらに、図 3 の一般化プラントでは、積分要素を含んでいない場合、定常偏差が生じる。感度重み W_s に積分特性を持たせることによってコントローラに積分特性を持たせることができるが、一般化プラントが可安定でなくなるため、標準の H^∞ 問題に帰着することができなくなる。

【0 0 1 6】

このため、本発明では、図 4 に示すような一般化プラントを考える。図 4 において、 M は外乱 w による制御量 y への影響を調整するためのスケーリング行列、 T は制御対象モデルの誤差の大きさを揃えるためのスケーリング行列、 $\alpha^{-1}I$ は定常偏差をなくすための積分特性をコントローラに持たせるための重みである。ここで、 $\alpha(s) = s / (s + a)$ と定義される。なお、 s はラプラス演算子であり、 $a (> 0)$ は任意の実数である。

【0 0 1 7】

1 5 はスケーリング行列 M を表すブロック、1 6 はスケーリング行列 T を表すブロック（操作量重み調整手段）、1 7 は重み $\alpha^{-1}I$ を表すブロックである。偏差 e_2 は、偏差 e に重み $\alpha^{-1}I$ を掛けたもので、コントローラに対する入力となる。以上のような一般化プラントにコントローラ K を加えたロバスト制御系の構成を図 5 に示す。図 5 において、1 8 はコントローラ K を表すブロックである。

【0 0 1 8】

本発明のコントローラの設計装置は、設定値 r に対して制御対象の出力である制御量 y が追従し、外乱 w の影響が除去され、かつ制御対象が変動したり制御対象のモデルに誤差があっても安定化できるようにコントローラ K のパラメータを決定することを目的としている。 H^∞ 制御問題は、 (r, w) から (z_1, z_2) までの伝達関数の H^∞ ノルム（ゲイン）を小さくする問題として考えることができる。すなわち、設定値追従特性、ロバスト安定性、外乱抑制性のそれぞれについて以下のように考えればよい。

【0 0 1 9】

(A) 設定値追従特性：設定値 r から偏差 e に至る伝達関数（より正確には、設定値 r に周波数重み $\alpha^{-1}W_s$ を掛けた、 r から z_1 に至る伝達関数）の H^∞ ノルム（ゲイン）を小さくすれば、偏差 e を小さくすることができ、設定値追従特

性を良好にすることができる。なお、 $\alpha^{-1}W_s$ は、追従する帯域を制限する（例えば低域のみ追従するようにする）ための周波数重みとなる。

【0 0 2 0】

(B) ロバスト安定性：制御対象の特性変動やモデル化時の誤差により実際の制御対象とそのモデルとの間には誤差が存在する。同定したモデルからの誤差の最大値を $\Delta(s)$ として見積もり、この誤差に対して $|\Delta(j\omega)| < |W_t(j\omega)|$ となる相補感度重み $W_t(s)$ を用いて、設定値 r から z_2 までの H^∞ ノルムが1以下となるようにコントローラ K を設計すれば、ロバスト安定化を達成することができる。

【0 0 2 1】

(C) 外乱抑制性：外乱 w から偏差 e に至る伝達関数（より正確には、外乱 w に周波数重み $\alpha^{-1}W_s$ を掛けた、 w から z_1 に至る伝達関数）の H^∞ ノルム（ゲイン）を小さくすれば、外乱 w が入ってきても、偏差 e を小さくすることができる、外乱抑制性を良好にすることができる。

次に、図4に示す一般化プラントの状態空間表現は次式で与えられるものとする。

【0 0 2 2】

【数5】

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_{p1} M w + B_{p2} T u \quad \dots (1)$$

【0 0 2 3】

【数6】

$$y = C_p x_p + D_{p1} M w + D_{p2} T u \quad \dots (2)$$

【0 0 2 4】

式(1)、式(2)において、 x_p は状態量、 A_p 、 B_{p1} 、 B_{p2} 、 C_p 、 D_{p1} 、 D_{p2} は制御対象の数値モデル11、12のパラメータである。式(2)より偏差 e は次式のように求めることができる。

【0 0 2 5】

【数 7】

$$e = y - r = C_p x_p + D_{p1} M w + D_{p2} T u - r \quad \dots (3)$$

【0 0 2 6】

また、図 4 に示す一般化プラントの構成により、出力 z_1' , z_2' は次式のよ
うに定義することができる。

$$z_1' = e_2 \quad \dots (4)$$

$$z_2' = u \quad \dots (5)$$

コントローラ K に積分特性を持たせるための周波数重みは、式 (3) を用いて
次式のように定義することができる。

【0 0 2 7】

【数 8】

$$\begin{aligned} x_\alpha &= A_\alpha x_\alpha + B_\alpha e \\ &= A_\alpha x_\alpha + B_\alpha C_p x_p + B_\alpha D_{p1} M w + B_\alpha D_{p2} T u - B_\alpha r \quad \dots (6) \end{aligned}$$

【0 0 2 8】

【数 9】

$$\begin{aligned} e_2 &= C_\alpha x_\alpha + D_\alpha e \\ &= C_\alpha x_\alpha + D_\alpha C_p x_p + D_\alpha D_{p1} M w + D_\alpha D_{p2} T u - D_\alpha r \quad \dots (7) \end{aligned}$$

【0 0 2 9】

式 (6)、式 (7) において、 x_α は $\alpha^{-1} I$ の状態量、 A_α 、 B_α 、 C_α 、 D_α
 α は $\alpha^{-1} I$ のパラメータである。以上の式を整理して状態空間表現すると、以下
の 3 式が得られる。

【0 0 3 0】

【数 1 0】

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ B_\alpha C_p & A_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & B_{p1} M & B_{p2} T \\ -B_\alpha & B_\alpha D_{p1} M & B_\alpha D_{p2} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad \dots (8)$$

【0 0 3 1】

【数 1 1】

$$\begin{bmatrix} z_1' \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_\alpha C_p & C_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D_\alpha & D_\alpha D_{p1} M & D_\alpha D_{p2} T \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad \dots (9)$$

【0 0 3 2】

【数 1 2】

$$e_2 = \begin{bmatrix} D_\alpha C_p & C_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D_\alpha & D_\alpha D_{p1} M & D_\alpha D_{p2} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad \dots (10)$$

【0 0 3 3】

式 (8)、式 (9)、式 (10) をドイルの記法で表すと、次式が得られる。

【0 0 3 4】

【数 1 3】

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad \dots (11)$$

【0 0 3 5】

ただし、パラメータ A は次式のように表すことができる。

【0 0 3 6】

【数 1 4】

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ B_\alpha C_p & A_\alpha \end{bmatrix} \quad \dots (12)$$

【0 0 3 7】

パラメータ B_1 , B_2 は次式のように表すことができる。

【0 0 3 8】

【数 1 5】

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & B_{p1} M \\ -B_\alpha & B_\alpha D_{p1} M \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} B_{p2} T \\ B_\alpha D_{p2} T \end{bmatrix} \quad \dots (13)$$

【0 0 3 9】

また、パラメータ C_1 , C_2 は次式のように表すことができる。

【0 0 4 0】

【数 1 6】

$$C_1 = \begin{bmatrix} D_\alpha C_p & C_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = [D_\alpha C_p \quad C_\alpha] \quad \dots (14)$$

【0 0 4 1】

そして、パラメータ D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} は次式のように表すことができる。

【0 0 4 2】

【数 1 7】

$$D_{11} = \begin{bmatrix} -D_\alpha & D_\alpha D_{p1} M \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} D_\alpha D_{p2} T \\ I \end{bmatrix}$$

$$D_{21} = [-D_\alpha \quad D_\alpha D_{p1} M] \quad , \quad D_{22} = D_\alpha D_{p2} T \quad \dots (15)$$

【0 0 4 3】

感度重み W_s と相補感度重み W_t とを設計し、式 (1 1) の出力部に掛け合わせ、 γ イテレーションを行うと、コントローラ K が状態空間表現で求まる。ここで、式 (1 1) の出力部とは、図 4 における出力 z_1' , z_2' に相当する部分を意味する。よって、式 (1 1) のパラメータ C_1 , D_{11} , D_{12} からなる出力方程式に対し、感度重み W_s と相補感度重み W_t とを対角成分とする次式のような対角行列 Q を左から掛け合わせればよい。こうして、コントローラ K のパラメータを算出することができる。

【0 0 4 4】

【数 1 8】

$$Q = \begin{bmatrix} W_s & 0 \\ 0 & W_t \end{bmatrix} \quad \dots (16)$$

【0 0 4 5】

なお、コントローラ K は一般化プラントによる H_∞ 制御問題の解となるコント

ローラであり、蒸留塔などのプラントに実装する実際のコントローラは、図 6 に示すように、コントローラ K に重み $\alpha^{-1} I$ とスケーリング行列 T とを掛け合わせたものとなる。

【0 0 4 6】

次に、本実施の形態における相補感度重み W_t の決定方法を説明する。制御対象は運転条件などにより特性が変動する。通常、ある 1 つのモデルに基づいて制御設計は行われるが、ロバスト制御設計では、制御対象の変動やモデリングの誤差の大きさを予め制御設計の際に加味し、それらの変動や誤差があっても、安定で、かつ制御性能があまり悪化しないように設計を行う。図 7 に制御対象のモデル 1 1 に対する加法的誤差を示す。図 7 において、1 9 は加法的誤差 Δ を表すブロックである。

【0 0 4 7】

ロバスト制御設計では、運転条件などによる制御対象の特性変動やモデル 1 1 の低次元化によるモデル誤差などを図 7 に示すような加法的誤差 Δ として表し、この加法的誤差 Δ によって制御対象の特性がモデル 1 1 からずれてもコントローラ出力が安定になるように設計する。そのためには、加法的誤差 Δ を覆うように相補感度重み W_t を決めてやればよい。この相補感度重み W_t の一般式を次式に示す。なお、モデル 1 2 の変化はシステムの安定性には関係しないので、モデル 1 1 のみが増加するものとして設計を行う。

【0 0 4 8】

【数 1 9】

$$W_t = \begin{bmatrix} W_{t1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{t2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & W_{t3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & W_{tN} \end{bmatrix} \quad \cdots (17)$$

【0 0 4 9】

本実施の形態では、スケーリング行列 T を用いて大きさを整えた加法的誤差 Δ に対して、誤差 Δ のゲインの最大値 G_{max} に安全係数 δ (δ は例えば 1) を掛

け合わせたものを相補感度重み W_t の要素とする。すなわち、相補感度重み W_t の要素（重み） W_{t1} , W_{t2} , W_{t3} , \dots , W_{tN} は、次式のように定義される。

$$W_{t1} = W_{t2} = W_{t3} = W_{tN} = (1 + \delta) \text{ G m a x} \quad \dots (18)$$

【0050】

本発明は、多変数制御系を対象としたものであり、操作量 u の数を N (N は 1 以上の整数) 種類としたとき、相補感度重み W_t は $N \times N$ 行列となる。 W_{tN} は N 番目の操作量 u_N に対する重みである。

次に、本発明における感度重み W_s の決定方法について説明する。まず、感度重み W_s の一般式を次式に示す。

【0051】

【数20】

$$W_s = \begin{bmatrix} W_{s1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{s2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & W_{s3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & W_{sL} \end{bmatrix} \quad \dots (19)$$

【0052】

制御量 y の数を L (L は 1 以上の整数) 種類としたとき、感度重み W_s は $L \times L$ 行列となる。感度重み W_s の要素 W_{sL} は L 番目の制御量 y_L に対する重みである。感度重み W_s を決定するには、図 5 のロバスト制御系を単純化した図 8 のような閉ループ系を用いて考える。図 8 において、11a は制御対象の数値モデル P を表すブロック、13a は周波数重み W_s' を表すブロックである。

【0053】

設定値追従や外乱抑制などの主として速応性に関する制御性能を示す感度関数を $S(s)$ としたとき、感度関数 $S(s)$ のゲイン $|S(j\omega)|$ が小さい程、設定値応答に与えるモデル変動の影響が少なくなり好ましい。各周波数における制御仕様を $S_{\text{spec}}(\omega)$ で与えると、次式のような感度関数 $S(s)$ に関する条件が得られる。

【0054】

【数 2 1】

$$|S(j\omega)| < S_{\text{spec}}(\omega); \forall \omega \quad \dots (20)$$

【0 0 5 5】

$\forall \omega$ は全ての周波数 ω について式 (20) が成立することを意味している。この感度関数 $S(s)$ を用いると、設定値追従特性を考慮したコントローラ K の設計指標は次式のようになる。

【0 0 5 6】

【数 2 2】

$$\|W_{sL}'(s)S(s)\|_{\infty} < 1 \quad \dots (21)$$

【0 0 5 7】

周波数重み $W_{sL}'(s)$ は、 $\alpha^{-1}(s)$ と $W_{sL}(s)$ とを掛け合わせたものであり、次式のように定義される。

【0 0 5 8】

【数 2 3】

$$W_{sL}'(s) = \alpha^{-1}(s)W_{sL}(s) \quad \dots (22)$$

【0 0 5 9】

式 (21) は、図 8 に示す閉ループ系の設定値 r から偏差 e に至る伝達関数（正確には、設定値 r に周波数重み $\alpha^{-1}(s)W_{sL}(s)$ を掛けた、 r から z_1 に至る伝達関数）の H_{∞} ノルムが 1 未満であることを示している。この式 (21) を満たすように、重み $W_{sL}(s)$ を設定することにより、設定値追従特性を考慮したコントローラ K の設計が可能となる。

【0 0 6 0】

次に、スケーリング行列 M の決定方法を説明する。スケーリング行列 M の一般式を次式に示す。

【0 0 6 1】

【数 2 4】

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & M_J \end{bmatrix} \quad \cdots (23)$$

【0 0 6 2】

外乱 w の数を J (J は 1 以上の整数) 種類としたとき、スケーリング行列 M は $J \times J$ 行列となる。スケーリング行列 M の要素 M_J は J 番目の外乱 w_J に対する重みであり、初期値は 1 である。各要素 M_J は、各外乱 w_J による制御量 y への影響を調整することにより外乱抑制性能を決める調整パラメータである。すなわち、特定の外乱 w の抑圧を強めたいときには、この外乱 w に関する要素 M_J を 1 より大きくする。

次に、本実施の形態におけるスケーリング行列 T の決定方法を説明する。スケーリング行列 T の一般式を次式に示す。

【0 0 6 3】

【数 2 5】

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T_N \end{bmatrix} \quad \cdots (24)$$

【0 0 6 4】

操作量 u の数を N (N は 1 以上の整数) 種類としたとき、スケーリング行列 T は $N \times N$ 行列となる。スケーリング行列 T の要素 T_N は N 番目の操作量 u_N に対する重みである。各要素 T_N は、制御対象モデル 1 1 の各ゲインの大きさがなるべく等しくなるように決定される。より具体的には、各要素 T_N は、次式のように決定される。

【0 0 6 5】

【数 2 6】

$$T_N = \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y1u1}\|_\infty, \|G_{y1u2}\|_\infty, \dots, \|G_{y1uN}\|_\infty)}{\|G_{y1uN}\|_\infty} \\ + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y2u1}\|_\infty, \|G_{y2u2}\|_\infty, \dots, \|G_{y2uN}\|_\infty)}{\|G_{y2uN}\|_\infty} \\ + \dots + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{yLu1}\|_\infty, \|G_{yLu2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLuN}\|_\infty)}{\|G_{yLuN}\|_\infty} \quad \dots (25)$$

【0 0 6 6】

式 (25) において、 G_{yLuN} は図 4 に示す制御対象モデル 1 1 の N 番目の操作量 u_N から L 番目の制御量 y_L に至る伝達関数、 $\|G_{yLuN}\|_\infty$ は同伝達関数の H_∞ ノルム (ゲイン) である。 $\max(\|G_{yLu1}\|_\infty, \|G_{yLu2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLuN}\|_\infty)$ は、 H_∞ ノルム $\|G_{yLu1}\|_\infty, \|G_{yLu2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLuN}\|_\infty$ の中で最大値を選択することを意味する。

【0 0 6 7】

H_∞ ノルム $\|G_{yLuN}\|_\infty$ を求めるには、状態方程式表現で表されるモデル 1 1 を次式のように伝達関数表現に直し、この伝達関数より周波数毎のゲインを算出すればよい。

【0 0 6 8】

【数 2 7】

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{y1u1} & G_{y1u2} & G_{y1u3} & \dots & G_{y1uN} \\ G_{y2u1} & G_{y2u2} & G_{y2u3} & \dots & G_{y2uN} \\ G_{y3u1} & G_{y3u2} & G_{y3u3} & \dots & G_{y3uN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{yLu1} & G_{yLu2} & G_{yLu3} & \dots & G_{yLuN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \quad \dots (26)$$

【0 0 6 9】

これにより、 H_∞ ノルム $\|G_{yLuN}\|_\infty$ を操作量 u 、制御量 y 毎に求めることができ、式 (25) よりスケーリング行列 T の要素 T_N を求めることができる。

次に、スケーリング行列 T の働きについて図 9 を用いて説明する。図 9 (a)

は、制御対象モデル 11 のゲイン特性（モデル 11 の周波数応答特性）を示している。なお、図 9 では、記載を簡単にするために 3 種類のゲイン特性のみを示しているが、操作量 u の数が N 種類、制御量 y の数が L 種類であれば、 $N \times L$ 種類のゲインが存在する。

【0070】

図 9（a）に示すように、スケーリング行列 T がいない場合、制御対象モデル 11 の各ゲインが不揃いであることが分かる。一般に、制御対象モデルのゲインが不揃いな場合、それに応じて制御対象モデルの誤差の大きさも不揃いになる。前述のように加法的誤差 Δ を覆うように相補感度重み W_t を決めるため、誤差が大きいものを基準にコントローラを設計することになり、得られるコントローラは非常に保守的、すなわち過剰に安定的なものになりがちである。

【0071】

そこで、スケーリング行列 T を用いてゲインの大きさを揃えるようにする。図 9（b）は、本実施の形態のスケーリング行列 T を設けた場合の制御対象モデル 11 のゲイン特性を示している。 $\|G_{y_{\max}}\|_{\infty}$ はモデル 11 の各ゲイン中の最大値である。図 9（b）から分かるように、式（24）、式（25）で示す本実施の形態のスケーリング行列 T の決定方法は、モデル 11 のゲイン最大値 $\|G_{y_{\max}}\|_{\infty}$ （より正確にはゲイン最大値の近傍）に各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を決めるものである。

【0072】

次に、以上のような動作を図 1 を用いて説明する。制御対象モデル 11 のパラメータは、設計装置の利用者によって制御対象モデル入力部 1 に設定される。

制御対象モデル登録部 2 は、記憶部 3 に予め記憶された制御対象モデルの数式に制御対象モデル入力部 1 から入力されたパラメータを登録する。制御対象モデル入力部 1 と制御対象モデル登録部 2 とは、制御対象モデルを設定するモデル設定手段を構成している。

【0073】

記憶部 3 は、式（1）～式（15）で説明した図 4 の一般化プラントの数式とこの一般化プラントの一部である制御対象モデルの数式とを記憶している。周波

数応答算出部 4 は、記憶部 3 に登録された、状態方程式表現で表されるモデル 1 1 を伝達関数表現に直して、この伝達関数より周波数毎のゲインを算出する。

続いて、スケーリング行列算出部 5 は、周波数応答算出部 4 で算出されたゲインに基づき、式 (24)、式 (25) を用いてスケーリング行列 T を算出し、これをコントローラ算出部 6 へ出力する。

【0074】

コントローラ算出部 6 は、記憶部 3 に記憶された一般化プラントの数式にスケーリング行列 T を登録して、 γ イテレーションを行うことにより、コントローラ K のパラメータを算出する。このとき、相補感度重み W_t と感度重み W_s とスケーリング行列 M とは、記憶部 3 の一般化プラントに予め設定されている。こうして、コントローラ K の設計を行うことができる。

【0075】

前述のように従来の手法では、スケーリング行列 T を決定する一般的な手法が確立されておらず、スケーリング行列 T を経験的に決定していた。これに対して、本実施の形態では、制御対象モデル 1 1 のゲイン最大値（より正確にはゲイン最大値の近傍）に各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を算出することにより、スケーリング行列 T を容易に決定することができる。これにより、設定値追従特性に優れ、かつ制御対象が変動したり制御対象モデル 1 1 に誤差があったりしても安定化できるという、 H^∞ 制御理論に基づく多変数コントローラの設計が容易となる。

なお、本実施の形態では、制御対象モデル 1 1 のゲイン最大値（より正確には最大値の近傍）に各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を決定しているが、モデル 1 1 のゲイン最小値あるいはゲイン平均値に各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を決定してもよい。ゲイン最小値（より正確には最小値の近傍）に各ゲインを揃えるには、式 (25) における \max を $\|G_{yLu1}\|_\infty$, $\|G_{yLu2}\|_\infty$, \dots , $\|G_{yLuN}\|_\infty$ の中で最小値を選択する \min に置き換えればよく、ゲイン平均値（より正確には平均値の近傍）に各ゲインを揃えるには、前記 \max を $\|G_{yLu1}\|_\infty$, $\|G_{yLu2}\|_\infty$, \dots , $\|G_{yLuN}\|_\infty$ の中で平均値を求める E に置き換えればよい。

【0076】

[実施の形態の2]

実施の形態の1では、外乱 w について考慮していないが、外乱 w に対する制御対象モデルが得られる場合がある。そこで、本実施の形態では、このような場合に外乱 w の影響を考慮しつつスケーリング行列 T を決定する方法について説明する。本実施の形態においても、スケーリング行列 T の一般式は実施の形態の1と同様に式(24)で表すことができる。

そして、本実施の形態では、スケーリング行列 T の要素 T_N を次式のように決定する。

【0077】

【数28】

$$T_N = \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y1w1}\|_\infty, \|G_{y1w2}\|_\infty, \dots, \|G_{y1wJ}\|_\infty)}{\|G_{y1uN}\|_\infty} + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{y2w1}\|_\infty, \|G_{y2w2}\|_\infty, \dots, \|G_{y2wJ}\|_\infty)}{\|G_{y2uN}\|_\infty} + \dots + \frac{1}{L} \cdot \frac{\max(\|G_{yLw1}\|_\infty, \|G_{yLw2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLwJ}\|_\infty)}{\|G_{yLuN}\|_\infty} \dots (27)$$

【0078】

式(27)において、 G_{yLwJ} は図4に示す制御対象モデル12のJ番目の外乱 w_J からL番目の制御量 y_L に至る伝達関数、 $\|G_{yLwJ}\|_\infty$ は同伝達関数の H_∞ ノルム(ゲイン)である。 $\max(\|G_{yLw1}\|_\infty, \|G_{yLw2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLwJ}\|_\infty)$ は、 H_∞ ノルム $\|G_{yLw1}\|_\infty, \|G_{yLw2}\|_\infty, \dots, \|G_{yLwJ}\|_\infty$ の中で最大値を選択することを意味する。

【0079】

H_∞ ノルム $\|G_{yLwJ}\|_\infty$ を求めるには、状態方程式表現で表されるモデル12を次式のように伝達関数表現に直し、この伝達関数より周波数毎のゲインを算出すればよい。

【0080】

【数 2 9】

$$\begin{bmatrix} y_{w1} \\ y_{w2} \\ y_{w3} \\ \vdots \\ y_{wL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{y1w1} & G_{y1w2} & G_{y1w3} & \cdots & G_{y1wJ} \\ G_{y2w1} & G_{y2w2} & G_{y2w3} & \cdots & G_{y2wJ} \\ G_{y3w1} & G_{y3w2} & G_{y3w3} & \cdots & G_{y3wJ} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{yLw1} & G_{yLw2} & G_{yLw3} & \cdots & G_{yLwJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_J \end{bmatrix} \quad \dots (28)$$

【0 0 8 1】

式 (28) において、 y_{wL} は外乱 w に対する制御対象モデル 1 2 の出力である。これにより、 H_∞ ノルム $\|G_{yLwJ}\|_\infty$ を外乱 w 、制御量 y 毎に求めることができ、式 (27) よりスケーリング行列 T の要素 T_N を求めることができる。

次に、スケーリング行列 T の働きについて図 10 を用いて説明する。図 10 (a) は、制御対象モデル 1 2 のゲイン特性 (モデル 1 2 の周波数応答特性) を示している。

【0 0 8 2】

なお、図 10 (a) では、記載を簡単にするために 3 種類のゲイン特性のみを示しているが、外乱 w の数が J 種類、制御量 y の数が L 種類であれば、 $J \times L$ 種類のゲインが存在する。 $\|G_{ywmax}\|_\infty$ は、モデル 1 2 の各ゲイン中の最大値である。

【0 0 8 3】

一方、図 10 (b) は、制御対象モデル 1 1 のゲイン特性を示している。図 10 (b) に示すように、制御対象モデル 1 2 のゲイン最大値と制御対象モデル 1 1 の各ゲインとが揃いであることが分かる。

【0 0 8 4】

図 10 (c) は、本実施の形態のスケーリング行列 T を設けた場合の制御対象モデル 1 1 のゲイン特性を示している。図 10 (c) から分かるように、式 (24)、式 (27) で示す本実施の形態のスケーリング行列 T の決定方法は、モデル 1 2 のゲイン最大値 $\|G_{ywmax}\|_\infty$ (より正確にはゲイン最大値の近傍) にモデル 1 1 の各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を決めるものである。

【0 0 8 5】

操作量 u に対するスケーリング行列 T は、コントローラを実装する際に閉ループ系の中に含まれる。したがって、モデル 1 1 のゲインの大きさを揃えることに意味があり、操作量 u から制御量 y に至るゲインをどこに揃えるかは必ずしも重要ではない。前述の実施の形態の 1 は、ゲインをどこに揃えるかの 1 例を示したものである。

【 0 0 8 6 】

これに対して、本実施の形態では、外乱入力を考慮しているので、外乱 w の抑制という観点で見た場合、入力される外乱 w の影響が操作量 u によって抑え込まれるようにする必要がある。そこで、本実施の形態では、最悪の状態に対応できるように、モデル 1 2 のゲイン最大値 $\| G_{ywmax} \| \infty$ (より正確にはゲイン最大値の近傍) にモデル 1 1 の各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を決めている。

【 0 0 8 7 】

本実施の形態においても、設計装置としての構成は実施の形態の 1 とほぼ同様である。そこで、図 1 を用いて本実施の形態の設計装置の動作を説明する。

制御対象モデル (本実施の形態ではモデル 1 1, 1 2) のパラメータは、設計装置の利用者によって制御対象モデル入力部 1 に設定される。

【 0 0 8 8 】

制御対象モデル登録部 2 は、記憶部 3 に予め記憶された制御対象モデルの数式に制御対象モデル入力部 1 から入力されたパラメータを登録する。

周波数応答算出部 4 は、記憶部 3 に登録された、状態方程式表現で表されるモデル 1 1, 1 2 を伝達関数表現に直して、この伝達関数より周波数毎のゲインを算出する。

【 0 0 8 9 】

続いて、スケーリング行列算出部 5 は、周波数応答算出部 3 で算出されたゲインに基づき、式 (2 4)、式 (2 7) を用いてスケーリング行列 T を算出し、これをコントローラ算出部 6 へ出力する。

コントローラ算出部 6 の動作は実施の形態の 1 と全く同じである。こうして、コントローラ K の設計を行うことができる。

【 0 0 9 0 】

〔実施の形態の 3〕

実施の形態の 1, 2 では、スケーリング行列 T によって、モデルのゲインの大きさを揃え、各制御量に対する制御の重み付けを等しくしようとしてきた。しかしながら、実際には、制御量 y 毎の制御が干渉し合い、制御が不安定になる等の問題が発生することがあり、各制御量に対する制御の重み付けを調整する必要がある場合がある。

【 0 0 9 1 】

そこで、本実施の形態では、直接的に制御量 y 毎に重み付けを行うための重み行列 S を導入する。

図 1 1 は、本発明の第 3 の実施の形態となるコントローラの設計装置の構成を示すブロック図、図 1 2 は、本実施の形態における一般化プラントの構成を示すブロック図である。

【 0 0 9 2 】

図 1 1 の設計装置は、図 1 に示す実施の形態の 1 あるいは 2 の設計装置に、制御量 y に対する重みを入力するための制御量重み入力部 7 と、制御量重みを装置内に登録する制御量重み登録部 8 と、制御量重みに基づいて重み行列 S を算出する重み行列算出部 9 とを加えたものである。

【 0 0 9 3 】

また、図 1 2 の一般化プラントは、図 4 に示す実施の形態の 1 あるいは 2 の一般化プラントに重み行列 S を表すブロック（制御量重み調整手段）20 を加えたものである。本実施の形態では、制御量重み調整手段 20（重み行列 S ）を操作量重み調整手段 16（スケーリング行列 T ）と制御対象モデル 11 とコントローラ K とからなる閉ループ系の内部に設けている。重み行列 S の一般式を次式に示す。

【 0 0 9 4 】

【数 3 0】

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & S_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & S_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & S_L \end{bmatrix} \quad \cdots (29)$$

【0 0 9 5】

制御量 y の数を L (L は 1 以上の整数) 種類としたとき、重み行列 S は $L \times L$ 行列となる。重み行列 S の要素 S_L は L 番目の制御量 y_L に対する重みである。各要素 S_L は、次式のように決定される。

【0 0 9 6】

【数 3 1】

$$S_L = \frac{W_{yL}}{\max(W_{y1}, W_{y2}, \cdots, W_{yL})} \quad \cdots (30)$$

【0 0 9 7】

式 (30) において、 W_{yL} は L 番目の制御量 y_L に対する制御量重みである。こうして、重み行列 S により制御量毎に直接的に重み付けを行うことができる。

次に、本実施の形態では、一般化プラントの構成を図 12 のように変更したことにより、次式が成立する。

$$e_1 = S e \quad \cdots (31)$$

【0 0 9 8】

この式 (31) と式 (3) により、式 (6)、式 (7) は次式のように書き直される。

【0 0 9 9】

【数 3 2】

$$\begin{aligned} x_\alpha &= A_\alpha x_\alpha + B_\alpha e_1 \\ &= A_\alpha x_\alpha + B_\alpha S C_p x_p + B_\alpha S D_{p1} M w + B_\alpha S D_{p2} T u - B_\alpha S r \end{aligned} \quad \cdots (32)$$

【0 1 0 0】

【数 3 3】

$$\begin{aligned} e_2 &= C_\alpha x_\alpha + D_\alpha e \\ &= C_\alpha x_\alpha + D_\alpha S C_p x_p + D_\alpha S D_{p1} M w + D_\alpha S D_{p2} T u - D_\alpha S r \\ &\quad \dots (33) \end{aligned}$$

【0 1 0 1】

これにより、式 (8)、式 (9)、式 (10) は次式のように書き直される。

【0 1 0 2】

【数 3 4】

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ B_\alpha S C_p & A_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & B_{p1} M & B_{p2} T \\ -B_\alpha S & B_\alpha S D_{p1} M & B_\alpha S D_{p2} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \\ &\quad \dots (34) \end{aligned}$$

【0 1 0 3】

【数 3 5】

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} z_1' \\ z_2' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_\alpha S C_p & C_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D_\alpha S & D_\alpha S D_{p1} M & D_\alpha S D_{p2} T \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \\ &\quad \dots (35) \end{aligned}$$

【0 1 0 4】

【数 3 6】

$$\begin{aligned} e_2 &= \begin{bmatrix} D_\alpha S C_p & C_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -D_\alpha S & D_\alpha S D_{p1} M & D_\alpha S D_{p2} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \\ &\quad \dots (36) \end{aligned}$$

【0 1 0 5】

式 (34)、式 (35)、式 (36) をドイルの記法で式 (11) のように表したとき、式 (11) におけるパラメータ A は次式のように表すことができる。

【0 1 0 6】

【数 37】

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ B_\alpha S C_p & A_\alpha \end{bmatrix} \quad \dots (37)$$

【0107】

パラメータ B_1 , B_2 は次式のように表すことができる。

【0108】

【数 38】

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & B_{p1} M \\ -B_\alpha S & B_\alpha S D_{p1} M \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} B_{p2} T \\ B_\alpha S D_{p2} T \end{bmatrix} \quad \dots (38)$$

【0109】

また、パラメータ C_1 , C_2 は次式のように表すことができる。

【0110】

【数 39】

$$C_1 = \begin{bmatrix} D_\alpha S C_p & C_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = [D_\alpha S C_p \quad C_\alpha] \quad \dots (39)$$

【0111】

そして、パラメータ D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} は次式のように表すことができる。

【0112】

【数 40】

$$D_{11} = \begin{bmatrix} -D_\alpha S & D_\alpha S D_{p1} M \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} D_\alpha S D_{p2} T \\ I \end{bmatrix}$$

$$D_{21} = [-D_\alpha S \quad D_\alpha S D_{p1} M], \quad D_{22} = D_\alpha S D_{p2} T \quad \dots (40)$$

【0113】

実施の形態の 1 と同様に感度重み W_s と相補感度重み W_t とを設計して、式 (11) の出力部に掛け合わせ、 γ イテレーションを行うと、コントローラ K が状

態空間表現で求まる。

なお、蒸留塔などのプラントに実装する実際のコントローラは、図 1 3 に示すように、コントローラ K に重み行列 S と重み $\alpha^{-1} I$ とスケーリング行列 T とを掛け合わせたものとなる。

【0 1 1 4】

次に、以上のような動作を図 1 1 を用いて説明する。制御対象モデル入力部 1、制御対象モデル登録部 2、周波数応答算出部 4 およびスケーリング行列算出部 5 の動作は、実施の形態の 1 あるいは 2 と全く同じである。なお、記憶部 3 a には、式 (1) ~ 式 (5)、式 (1 1)、式 (3 2) ~ 式 (4 0) で説明した図 1 2 の一般化プラントの数式とこの一般化プラントの一部である制御対象モデルの数式とが記憶されている。

【0 1 1 5】

L 番目の制御量 y_L に対する制御量重み W_{yL} は、設計装置の利用者によって制御量重み入力部 7 に設定される。この制御量重み W_{yL} の設定は、各制御量 y 毎に行われる。

制御量重み登録部 8 は、制御量重み入力部 7 から入力された制御量重み W_{yL} を重み行列算出部 9 へ出力する。

重み行列算出部 9 は、制御量重み W_{yL} を基に式 (2 9)、式 (3 0) を用いて重み行列 S を算出し、これをコントローラ算出部 6 a へ出力する。

【0 1 1 6】

コントローラ算出部 6 a は、記憶部 3 a に記憶された一般化プラントの数式にスケーリング行列 T と重み行列 S とを登録して、 γ イテレーションを行うことにより、コントローラ K のパラメータを算出する。このとき、相補感度重み W_t と感度重み W_s とスケーリング行列 M とは、記憶部 3 a の一般化プラントに予め設定されている。こうして、コントローラ K の設計を行うことができる。

【0 1 1 7】

以上のように、本実施の形態では、重み行列 S を導入することにより、制御量 y 毎に直接的に重み付けを行うことができる。これにより、安定性の高いコントローラを設計することができる。また、重み行列 S を導入することにより、スケ

ーリング行列Tに制御量yに対する重み付けの役割を持たせる必要がなくなる。

【0 1 1 8】

〔実施の形態の4〕

実施の形態の3では、制御量重み調整手段20（重み行列S）を閉ループ系の内部に設けているが、閉ループ系の外部に設けてもよい。図14は、本発明の第4の実施の形態における一般化プラントの構成を示すブロック図である。

本実施の形態では、制御量重み調整手段20（重み行列S）を周波数感度重み調整手段13の前段に設けている。重み行列Sの決定方法は、式（29）、式（30）で説明した実施の形態の3の決定方法と全く同じである。

【0 1 1 9】

次に、本実施の形態では、一般化プラントの構成を図14のように変更したことにより、式（4）は次式のように書き直される。

$$z_1' = S e_2 \quad \dots (41)$$

これにより、式（9）は次式のように書き直される。

【0 1 2 0】

〔数41〕

$$\begin{bmatrix} z_1' \\ z_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S D_\alpha C_p & S C_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_\alpha \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S D_\alpha & S D_\alpha D_{p1} M & S D_\alpha D_{p2} T \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ w \\ u \end{bmatrix} \quad \dots (42)$$

【0 1 2 1】

式（8）、式（10）、式（42）をドイルの記法で式（11）のように表したとき、式（11）におけるパラメータ C_1 、 C_2 は次式のように表すことができる。

【0 1 2 2】

〔数42〕

$$C_1 = \begin{bmatrix} S D_\alpha C_p & S C_\alpha \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = [D_\alpha C_p \quad C_\alpha] \quad \dots (43)$$

【0 1 2 3】

また、パラメータ D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} は次式のように表すことができる。

【0 1 2 4】

【数 4 3】

$$\begin{aligned} D_{11} &= \begin{bmatrix} -S D_{\alpha} & S D_{\alpha} D_{p1} M \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, & D_{12} &= \begin{bmatrix} S D_{\alpha} D_{p2} T \\ I \end{bmatrix} \\ D_{21} &= [-D_{\alpha} \quad D_{\alpha} D_{p1} M] & D_{22} &= D_{\alpha} D_{p2} T \quad \dots (4.4) \end{aligned}$$

【0 1 2 5】

パラメータ A , B_1 , B_2 は、式 (1 2)、式 (1 3) に示すとおりである。
 なお、本実施の形態において、蒸留塔などのプラントに実装する実際のコントローラは、図 6 に示すように、コントローラ K に重み $\alpha^{-1} I$ とスケーリング行列 T とを掛け合わせたものとなる。

本実施の形態においても、設計装置としての構成は実施の形態の 3 とほぼ同様である。そこで、図 1 1 を用いて本実施の形態の設計装置の動作を説明する。

制御対象モデル入力部 1、制御対象モデル登録部 2、周波数応答算出部 4 及びスケーリング行列算出部 5 の動作は、実施の形態の 1 あるいは 2 と全く同じである。記憶部 3 a には、式 (1) ~ 式 (3)、式 (5) ~ 式 (8)、式 (1 0) ~ 式 (1 3)、式 (4 1) ~ 式 (4 4) で説明した図 1 4 の一般化プラントの数式とこの一般化プラントの一部である制御対象モデルの数式とが記憶されている。

【0 1 2 6】

制御量重み入力部 7、制御量重み登録部 8 及び重み行列算出部 9 の動作は、実施の形態の 3 と全く同じである。

コントローラ算出部 6 a は、記憶部 3 a に記憶された一般化プラントの数式にスケーリング行列 T と重み行列 S とを登録して、 γ イテレーションを行うことにより、コントローラ K のパラメータを算出する。こうして、コントローラ K の設計を行うことができる。

【0 1 2 7】

なお、本実施の形態では、制御量重み調整手段 2 0 (重み行列 S) を周波数感度重み調整手段 1 3 の前段に設けているが、周波数感度重み調整手段 1 3 の後段

に設けるようにしてもよい。

また、スケーリング行列 T によって制御対象モデル 1 1 のゲインの大きさが揃うことにより、重み行列 S を容易に調整することができるので、実施の形態の 3, 4 において実施の形態の 1 あるいは 2 で説明したスケーリング行列 T の決定方法を用いることは前提条件である。

【0 1 2 8】

【発明の効果】

本発明によれば、制御対象モデルの周波数応答に基づき制御対象モデルの各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を算出することにより、スケーリング行列 T を容易に決定することができる。これにより、設定値追従特性に優れ、かつ制御対象が変動したり制御対象モデルに誤差があったりしても安定化できるという、 $H\infty$ 制御理論に基づく多変数コントローラの設計が可能となる。その結果、制御対象の変動や数値モデルの不確かさを考慮した多変数制御系の設計が容易となる。また、制御実行時の計算負荷が軽く、小規模な制御システムでも実装できるという $H\infty$ 制御の特徴を生かした多変数コントローラを実現することができる。

【0 1 2 9】

また、第 1、第 2 の制御対象モデルの周波数応答に基づき第 2 の制御対象モデルの各ゲイン中の最大値に第 1 の制御対象モデルの各ゲインが揃うようにスケーリング行列 T を算出することにより、スケーリング行列 T を容易に決定することができる。これにより、設定値追従特性と外乱抑制性に優れ、かつ制御対象が変動したり制御対象モデルに誤差があったりしても安定化できるという、 $H\infty$ 制御理論に基づく多変数コントローラの設計が可能となる。その結果、制御対象の変動や数値モデルの不確かさを考慮した多変数制御系の設計が容易となる。また、制御実行時の計算負荷が軽く、小規模な制御システムでも実装できるという $H\infty$ 制御の特徴を生かした多変数コントローラを実現することができる。

【0 1 3 0】

また、操作量重み調整手段と操作量に対する制御対象モデルとコントローラとからなる閉ループ系の内部に制御量重み調整手段を設けた一般化プラントを用いることにより、各制御量毎に直接的に重み付けができるので、より制御性能の高

いコントローラを設計することができる。

【 0 1 3 1 】

また、閉ループ系の設定値追従特性を決定するための周波数感度重み調整手段の前段または後段に制御量重み調整手段を設けた一般化プラントを用いることにより、各制御量毎に直接的に重み付けができるので、より制御性能の高いコントローラを設計することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 の実施の形態となるコントローラの設計装置の構成を示すブロック図である。

【図 2】 実際の制御対象を数式化したモデルの構成を示すブロック図である。

【図 3】 従来の一般化プラントの構成を示すブロック図である。

【図 4】 本発明の設計装置で用いる一般化プラントの構成を示すブロック図である。

【図 5】 図 4 の一般化プラントにコントローラを加えたロバスト制御系の構成を示すブロック図である。

【図 6】 本発明の第 1 の実施の形態の設計装置を用いて設計したコントローラを含む実際のコントローラの構成を示すブロック図である。

【図 7】 制御対象の数値モデルの加法的誤差を示す図である。

【図 8】 感度重みの決定に際して用いる閉ループ系の構成を示すブロック図である。

【図 9】 本発明の第 1 の実施の形態におけるスケーリング行列の働きを説明するための図である。

【図 1 0】 本発明の第 2 の実施の形態におけるスケーリング行列の働きを説明するための図である。

【図 1 1】 本発明の第 3 の実施の形態となるコントローラの設計装置の構成を示すブロック図である。

【図 1 2】 本発明の第 3 の実施の形態における一般化プラントの構成を示すブロック図である。

【図 1 3】 本発明の第 3 の実施の形態の設計装置を用いて設計したコントローラを含む実際のコントローラの構成を示すブロック図である。

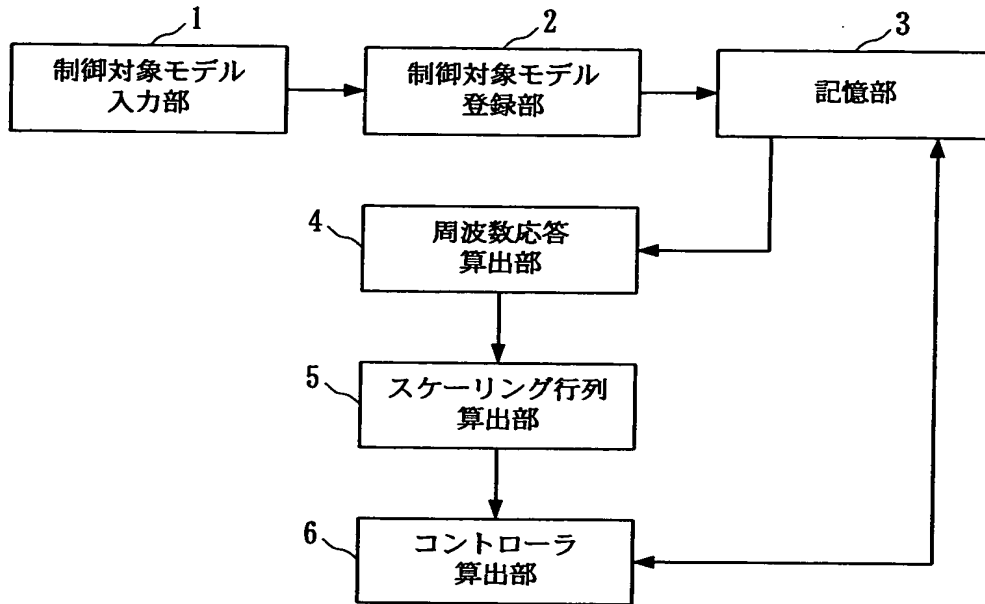
【図 1 4】 本発明の第 4 の実施の形態における一般化プラントの構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

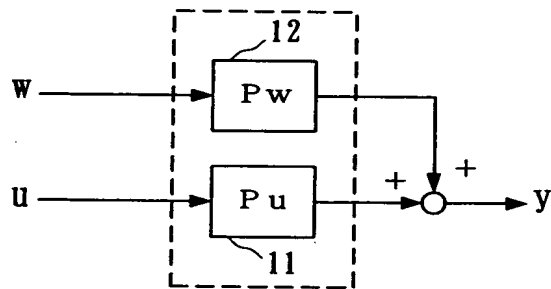
1 …制御対象モデル入力部、 2 …制御対象モデル登録部、 3、 3 a …記憶部、 4 …周波数応答算出部、 5 …スケーリング行列算出部、 6、 6 a …コントローラ算出部、 7 …制御量重み入力部、 8 …制御量重み登録部、 9 …重み行列算出部、 1 1， 1 2 …制御対象モデル、 1 3 …周波数感度重み調整手段、 1 6 …操作量重み調整手段、 2 0 …制御量重み調整手段。

【書類名】 図面

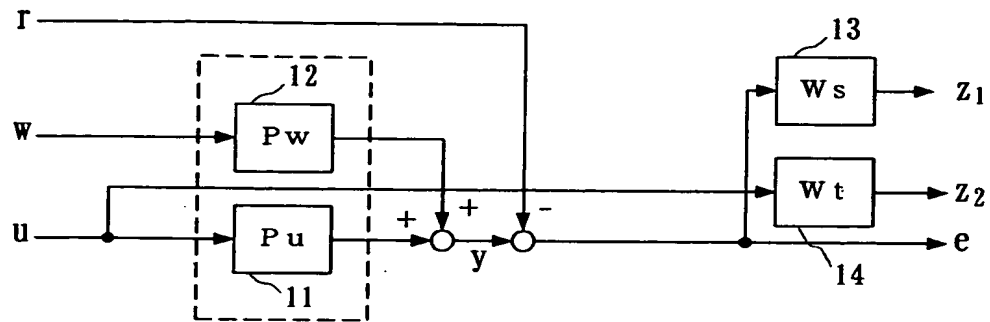
【図 1】



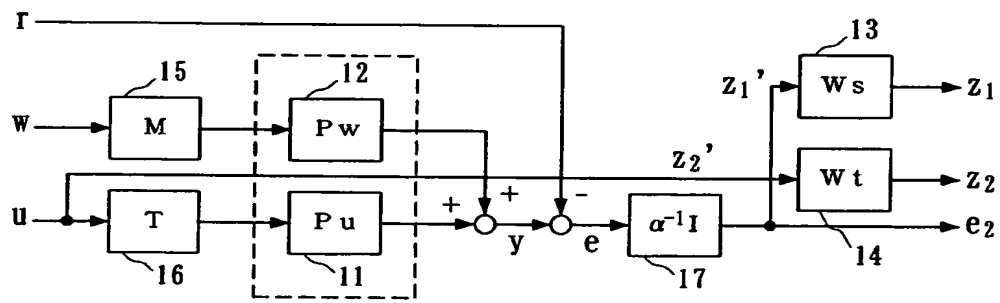
【図 2】



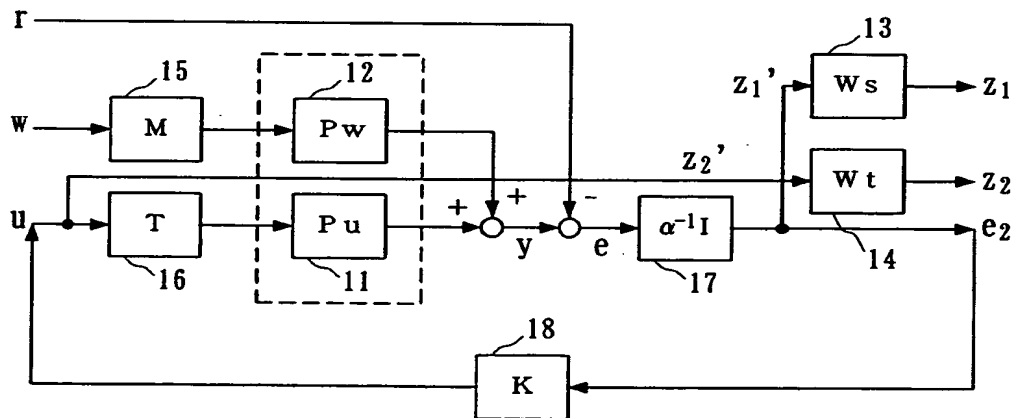
【図 3】



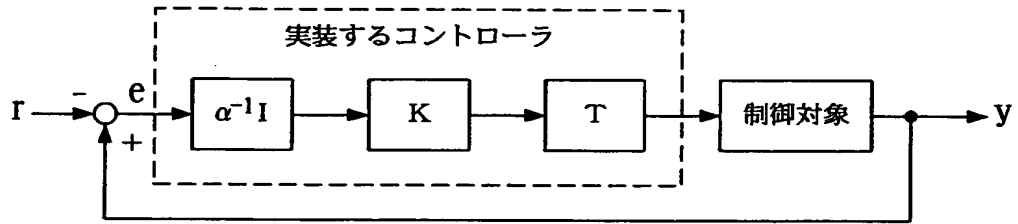
【図 4】



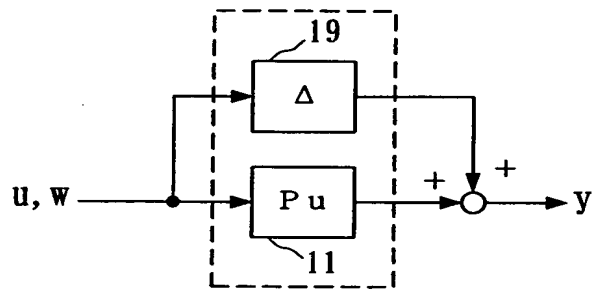
【図 5】



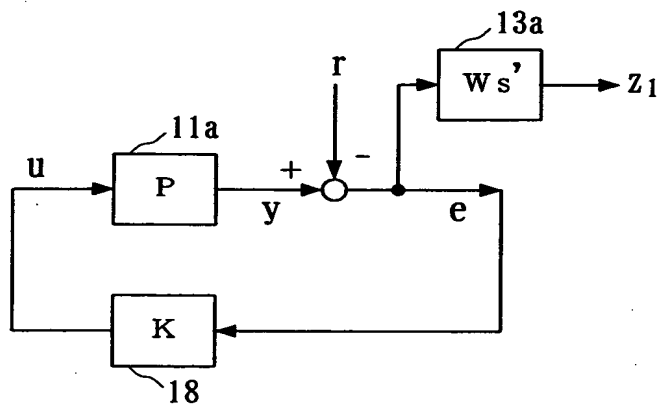
【図 6】



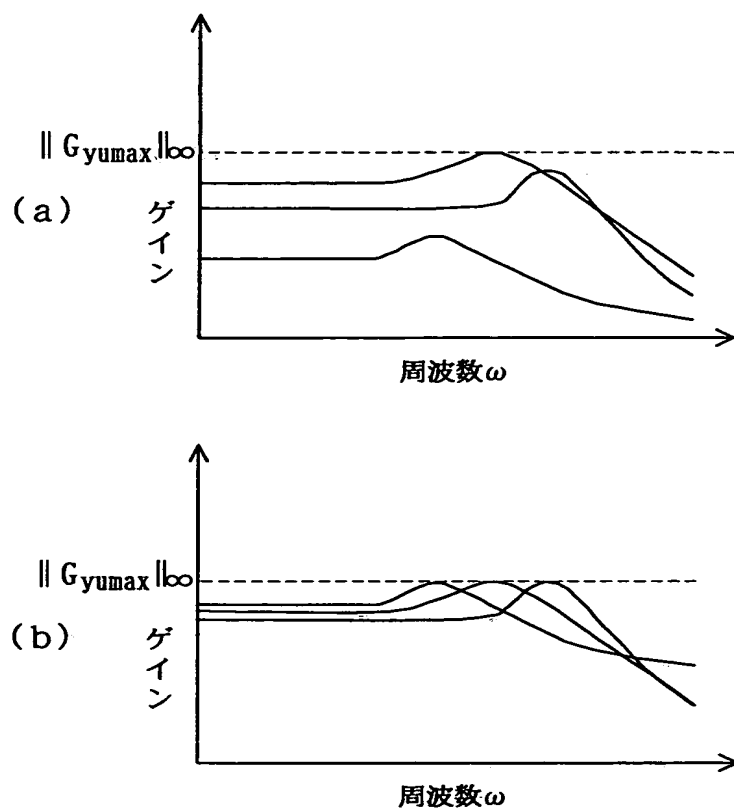
【図 7】



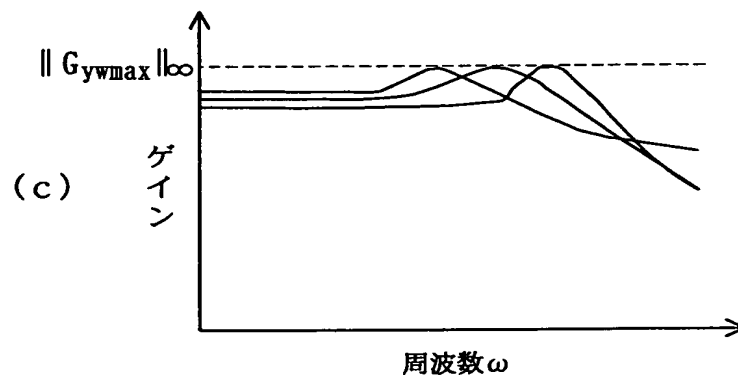
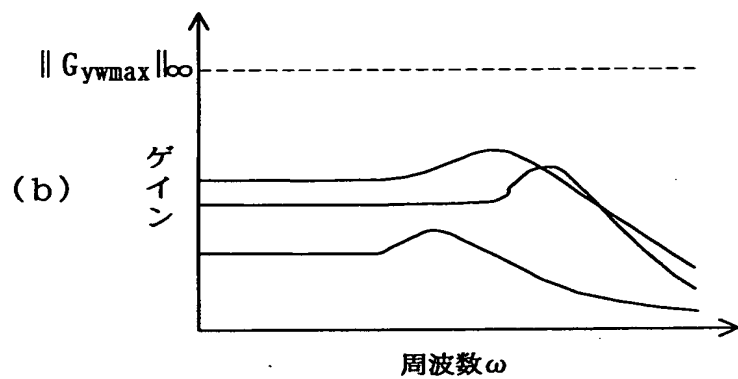
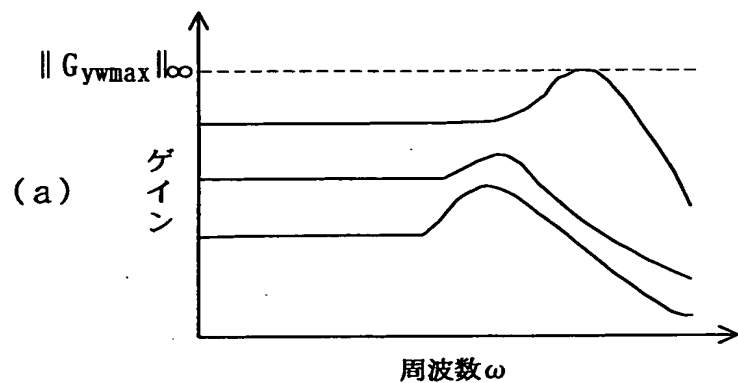
【図 8】



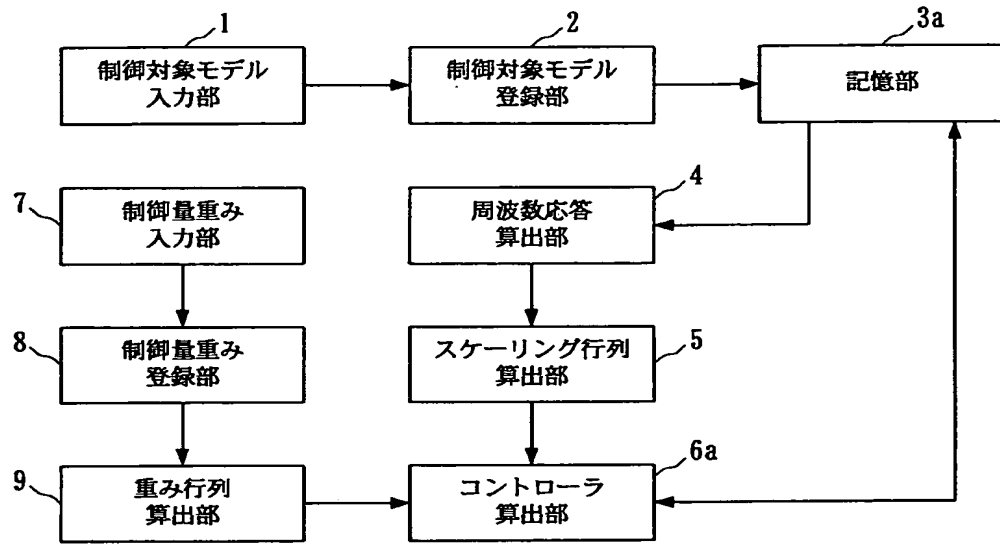
【図 9】



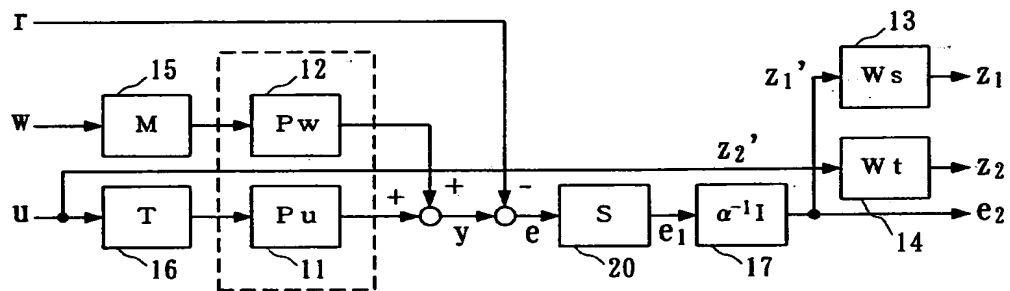
【図 1 0】



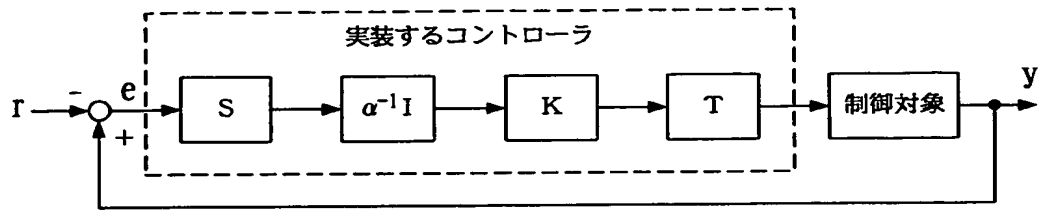
【図 1 1】



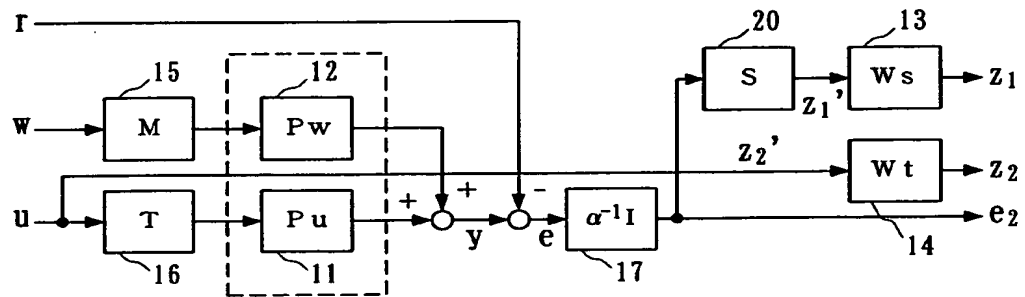
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 スケーリング行列の決定を容易にし、 H^∞ 制御理論に基づくコントローラの設計を容易にする。

【解決手段】 記憶部 3 は、一般化プラントの数式とこの一般化プラントの一部である制御対象モデルの数式とを記憶している。周波数応答算出部 4 は、制御対象モデルの周波数応答を算出する。スケーリング行列算出部 5 は、スケーリング行列 T を、制御対象モデルの周波数応答に基づき制御対象モデルの各ゲインが揃うように算出する。コントローラ算出部 6 は、記憶部 3 に記憶された一般化プラントにスケーリング行列 T を適用して、コントローラのパラメータを算出する。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 6 6 6 6]

1. 変更年月日	1 9 9 8 年 7 月 1 日
[変更理由]	名称変更
住 所	東京都渋谷区渋谷 2 丁目 1 2 番 1 9 号
氏 名	株式会社山武

